

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.014

考虑换乘点修建的多模式离散网络设计研究

丁建勋¹, 王啸飞¹, 樊银超², 龙建成¹

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国矿业大学 数学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:出行者进行一次完整的出行往往会通过多种交通模式来实现,其中停车换乘有效衔接了小汽车出行模式向公共交通模式的转换,在此过程中需要在城市中设置特定区域或设施以完成停车换乘。文章提出了一个考虑换乘点修建的多模式网络设计问题(network design problem, NDP),构建了一种双层规划模型,上层模型从决策者角度考虑换乘停车点修建规划,下层模型为多模式网络下的模式划分和交通分配问题。通过提出基于代理模型的算法来求解上述双层规划模型,结合自适应平均法(self-regulated averaging method, SRAM)和梯度投影(gradient projection, GP)算法解决下层模式划分与交通分配问题。最后采用 Sioux Falls 网络进行数值算例分析,验证了算法和模型的有效性。结果表明,停车换乘点的合理修建能够有效降低城市交通网络的系统总费用,提出的基于代理模型算法相较遗传算法在效率和精度上更高。

关键词:城市交通;换乘点;代理模型算法;多模式网络;双层规划

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)07-0957-07

Research on a multimodal discrete network design considering the construction of transfer nodes

DING Jianxun¹, WANG Xiaofei¹, FAN Yinchao², LONG Jiancheng¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Mathematics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Travelers often employ various modes of transportation to accomplish a complete trip. Among them, park-and-ride facilitates the transition from car travel to public transportation systems. This process necessitates the establishment of designated areas or facilities within the city to enable park-and-ride transfers. Consequently, this paper proposes a multimodal network design problem (NDP) that considers the construction of transfer nodes. A bilevel programming model is constructed, where the upper-level model considers the decision-makers' perspective in planning the placement of park-and-ride facilities, while the lower-level model considers the mode division and traffic allocation problems under the multimodal network. A surrogate-model-based algorithm is presented to solve the aforementioned bilevel programming model, incorporating the self-regulated averaging method (SRAM) and gradient projection (GP) algorithm to address mode splitting and traffic assignment in the lower level. Finally, numerical experiments are conducted on the Sioux Falls network to validate the effectiveness of the algorithm and model. The experimental results demonstrate that the rational placement of park-and-ride facilities can effectively reduce the overall system cost of the urban transportation network. The proposed surrogate-model-based algorithm outperforms genetic algorithms in terms of both efficiency and accuracy.

Key words: urban traffic; transfer node; surrogate-model-based algorithm; multimodal transport network; bilevel programming

收稿日期:2024-02-02;修回日期:2024-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71925001;72271079;52472312)

作者简介:丁建勋(1981—),男,安徽淮北人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:dingjianxun@hfut.edu.cn;
龙建成(1983—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

随着城市人口的增长和汽车拥有量的增加,城市交通拥堵、空气污染和交通事故等问题给人们的生活带来了很多困扰,因此建立一个高效、可持续的交通网络变得尤为重要。网络设计问题(network design problem, NDP)是解决交通网络系统优化的有效方法。通常 NDP 包括连续网络设计问题、离散网络设计和混合网络设计问题,这 3 类网络设计问题主要集中在道路、公交及多模式网络中进行讨论。

针对道路网络设计,文献[1]采用连续变量建立城市连续网络设计的模型,采用流量均衡约束描述道路网络中出行者的选择行为,为后续网络设计的进一步研究奠定了基础;文献[2]对网络设计问题进行了全面阐述,并给出一个双层规划模型的一般形式;文献[3]基于弹性的多类型需求建立自动驾驶多阶段部署的双层规划模型,上层为基础设施投资决策问题,下层为共同进行出行模式和路径选择的均衡问题;文献[4]从公交出行者和公交管理部门 2 个方面进行考虑,建立一种描述动态公交网络设计问题的双层规划模型,上层为基于时刻表的公交网络设计问题,下层是动态公交网络用户最优配流问题;文献[5]考虑乘客换乘和拥堵影响,为公交线路规划和频率设置建立一种双层优化模型,上层为最小化乘客换乘次数,下层为带有容量约束的公交分配问题,针对该双层规划问题,提出采用混合人工蜂群算法求解。以上都是针对单一模式的网络设计问题,其主要关注的是一个特定交通模式(如汽车、公共交通等)的网络设计,通常针对某一特定的交通系统或者交通方式展开研究。

与传统的单一模式交通网络设计问题相比,多模式网络中出行者不但要考虑出行方式和出行路径的选择,还要考虑不同模式与网络之间的换乘,因此,基于多模式网络的网络设计问题的研究更加符合实际道路交通状况,但同时也更加的复杂。文献[6]对多模式网络中出行者的模式选择和路径选择进行描述;文献[7]基于交叉嵌套 Logit 模型(cross-nested logit, CNL)的模式划分和交通分配模型来描述出行者的路径选择和模式选择行为;文献[8]提出了一种基于 CNL 的模式划分和基于变分不等式(variational inequality, VI)的流量分配相结合的通用不动点模型,以在更现实的多模式网络中描述模式划分和交通分配问题;文献[9]提出一个多模式网络容量问题,在此基础上结合模式划分和交通分配模型提出了

一个三级多模式网络设计问题,旨在最大化网络容量。

综上,有关多模式网络设计问题的研究中多为针对各个模式网络中的要素进行决策,例如公交网络中的公交车发车频率优化,道路网络中的路段修建或者改建与否等,建立最优化数学模型,考虑不同背景条件或求解算法以达到预期的优化目标,包括系统总成本、投资预算、出行时间、多目标优化等。但是针对在多模式网络中,各个网络之间进行换乘决策时对于网络的影响情况的研究较少。针对上述问题,本文提出了一个基于多模式网络考虑换乘点修的网络设计问题,并构建一种双层规划模型,上层为考虑道路与公交网络间换乘停车点的修建与否的规划问题,下层为基于 CNL 的模式划分和基于 VI 的交通分配问题。由于双层规划问题属于 NP-Hard 问题,对于此类问题求解较为复杂,通常会采用传统的启发式算法(如遗传算法、蚁群算法)进行求解^[10-11],当利用传统启发式算法求解时,每次迭代需要对目标函数值反复多次求解,大大增加求解时间,相较于传统启发式算法,代理模型算法能够有效减少对目标函数的求解次数,因此本文提出基于代理模型算法来求解该双层规划问题。

1 问题描述和数学模型

本文考虑 3 种出行模式的多模式网络,分别为小汽车出行(Car)、公交出行(Transit)以及小汽车到公交的停车换乘出行(C&T)。为保证出行者可以从道路网络选择换乘到公交网络来完成一次出行任务,公交网络与道路网络之间需要通过一个换乘点进行联系,换乘点由换乘路段和换乘区域组成,其中换乘区域代表汽车到公交之间的换乘设施,换乘路段包括汽车行驶到换乘区域的驾驶路段以及行人从换乘区域步行到公交站点的路段。为便于求解作如下假设:① 出行者进行换乘必须通过换乘点停车再走到公交车站;② 汽车到换乘区域和换乘区域到公交的路段费用都仅取决于各自平均旅行时间和时间价值系数,换乘点的停车收费成本忽略不计,故本文在求解时将换乘点虚拟成一条换乘路段,赋值固定的路段成本,下文对于换乘点的规划可以看作对于虚拟换乘路段的规划;③ 换乘点的候选位置通常选取在城郊附近站点,保证修建的可行性,本文默认所有站点都可设置换乘点,即均有候选换乘点。为找到最优换乘点规划策略,本文提出了一种双层规

划模型,上层为最小化系统总出行成本和总建设成本,下层为模式划分与交通分配问题,用来求解换乘点规划问题。

1.1 网络构建

本文考虑的多模式网络由道路子网络、公交子网络以及用来连接道路子网络和公交子网络的换乘点组成。实际交通网络中相邻的2个公交站之间可能存在多条公交线路可达,即共线问题。为了考虑公交系统的共线问题,本文采用文献[12]的网络拓展方法,构建了拓展公交子网络,如图1所示。

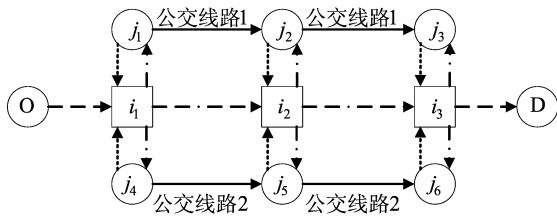


图1 扩展公交子网络示例

为不同线路上的每个换乘节点*i*引入虚拟节点*j*,便于描述旅客在车站的上下车行为。一个单一 OD(origin-destination)对的换乘子网络通过换乘点将道路网络与公交网络相联系,如图2所示。

其中,节点*r*为道路网络节点,换乘点包括换

$$P_m^w = \frac{\sum_{e \in E^w} (\alpha_{em}^w)^{1/\lambda_e^w} \exp\left(-\frac{\theta^w}{\lambda_e^w} \pi_{em}^w\right) \left[\sum_{s \in M_e^w} (\alpha_{es}^w)^{1/\lambda_e^w} \exp\left(-\frac{\theta^w}{\lambda_e^w} \pi_{es}^w\right) \right]^{\lambda_e^w - 1}}{\sum_{e \in E^w} \left[\sum_{s \in M_e^w} (\alpha_{es}^w)^{1/\lambda_e^w} \exp\left(-\frac{\theta^w}{\lambda_e^w} \pi_{es}^w\right) \right]^{\lambda_e^w}}, \quad \forall m \in M_e^w, e \in E^w, w \in W \quad (1)$$

其中: α_{em}^w 为在 OD 对 w 之间模式 m 对网络 e 的隶属度; λ_e^w 为每个网络 e 的嵌套参数; θ^w 为根部色散参数; P_m^w 为用户在 OD 对 w 间选择模式 m 完成行程的概率; π_{em}^w 为网络 e 中模式 m 的最小出行成本; s 为 OD 对 w 之间的出行模式。

虽然相同的模式 m 可能属于 CNL 模型中的 2 个上层网络,但其最小出行成本 π_{em}^w 实际上是相同的,即 $\pi_m^w = \pi_{em}^w$,因此模式选择概率 P_m^w 是关于 π_m^w 的函数。

1.2.2 多模式交通分配

假设每种出行模式下的所有出行者的路径选择遵循用户均衡原则,即当达到均衡条件时,每种出行模式下的所有出行者都选择了自己的最短路径,任何人都不能单方面改变自己的路径以降低自己的广义出行成本。在平衡时,要求路径流量

乘区域、道路子网络到换乘区域的行驶路段和换乘区域到公交子网络的步行路段。

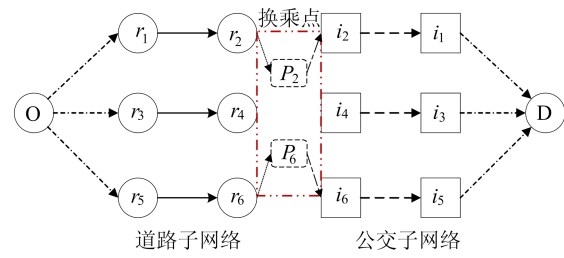


图2 C&T 模式的换乘子网络示例

1.2 下层模式划分与交通分配

1.2.1 模式划分

考虑到停车换乘模式与模式之间的重叠,本文采用 CNL 模型对多模式交通分配问题进行模式划分。其通过引入隶属度来捕捉模式相似性,其中每个出行模式备选方案可能属于一个 OD 对之间的多个上层网络,这更适用于分析本文所考虑的多模式网络中的模式划分。每个 OD 对 $w \in W$ 中涉及的网络集合可以表示为 $E^w = \{C, T\}$,其中: C 代表道路网络; T 代表公交网络。每个网络中对应的模式集合为 $M_C^w = \{Car, C\&T\}$, $M_T^w = \{Transit, C\&T\}$ 。

根据 CNL 模型,对于给定的 OD 对 w ,模式 m 的选择概率计算式为:

和相应的路径费用满足下列平衡条件:

$$c_k^{m,w} - \pi_m^w = 0, \quad h_k^{m,w} > 0 \quad (2)$$

$$c_k^{m,w} - \pi_m^w \geq 0, \quad h_k^{m,w} = 0 \quad (3)$$

其中: $\forall k \in K_m^w, m \in M^w, w \in W$; $c_k^{m,w}$ 为不同 OD 对 w 之间模式 m 的路径 k 的出行成本; π_m^w 为不同 OD 对 w 之间模式 m 的最小广义出行成本; $h_k^{m,w}$ 为不同 OD 对 w 之间模式 m 路径 k 上的流量; K_m^w 为不同 OD 对 w 之间模式 m 的路径集合。

基于上述平衡条件,用于多模式交通分配的基于路径的通用 VI 模型被公式化为:

$$\sum_{w \in W} \sum_{m \in M^w} \sum_{k \in K_m^w} c_k^{m,w} (h_k^{m,w} - h_k^{*,m,w}) \geq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_m^w} h_k^{m,w} = q_m^w \quad (5)$$

$$h_k^{m,w} \geq 0 \quad (6)$$

其中: $h_k^{m,w}$ 为 OD 对 w 之间模式 m 的路径 k 的流量; $h_k^{*,m,w}$ 为 OD 对 w 间模式 m 的最优路径流量。 H 为式(5)流量守恒和式(6)非负约束定义的路径流量可行集。

1.2.3 不动点模型

通过结合 CNL 和基于路径的 VI 模型来制定不动点模型。设 Q^w 表示 OD 对 w 之间的总需求, 模式需求计算式为:

$$q_m^w = Q^w P_m^w, \quad \forall m \in M^w, w \in W \quad (7)$$

通过上述过程, 注意到模式划分概率是模式阻抗 π_m^w 的函数, π_m^w 可以被视为模式需求的隐函数。因此, 模式划分和交通分配问题可以表述为以下不动点问题:

$$q = F(q) \quad (8)$$

其中: $q = (q_m^w)$; $F(q) = Q^w P_m^w(\pi_m^w)$ 。当获得解时, 所有模式阻抗都是确定的。需要注意的是, 对于不动点模型, 要求保证给定 q 的模式阻抗 π_m^w 的唯一性, 详细证明可参考文献[8]。

1.3 上层换乘点修建规划

上层换乘点修建规划模型是基于政府管理者的角度, 以最小化系统总出行成本和总建设成本为目标函数, 考虑多模式网络中换乘点修建对系统总费用的影响, 具体模型为:

$$\min_u Z = \sum_{v_a \in A^r} v_a t_a(v_a) + \varphi \sum_{n \in N_c} g_n(u_n) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } u_n \in \{0, 1\}, \forall n \in N_c \quad (10)$$

其中: N_c 为候选换乘点集合; A^r 为道路路段集合; g_n 为换乘点修建成本函数; u_n 为上层问题的 0 和 1 决策变量, 表示候选换乘点 n 是否修建; φ 为目标函数数量纲归一化系数; u 为换乘点修建的一组方案, 记作 $u = (u_n)$; v_a 为下层问题求解出的路段流量; $t_a(v_a)$ 为换乘点 n 下新建决策为 u_n 、流量为 v_a 时的阻抗。

2 求解算法

2.1 下层不动点模型的求解

对于下层不动点模型的求解, 首先, 基于通过模式划分获得的确定模式需求 q , 求解交通分配问题, 获得用户均衡时不同模式的出行阻抗; 其次, 通过给定各模式的出行阻抗, 求解基于 CNL 的模式划分模型, 得到不同模式的新出行需求; 这 2 个问题是相互关联的, 对于多模式网络来说很难同时解决。不动点模型的求解具体步骤如下:

1) 初始化。基于全有全无分配获得多模式网络的模式需求和流量分配。

2) 迭代求解多模式交通分配问题和模式划分问题。

3) 收敛判断。若满足收敛条件, 则停止, 得到各模式需求和路段流量; 否则, 重新初始化流量分配并返回步骤 2)。

2.1.1 多模式交通分配问题的求解

采用一种基于路径的算法求解多模式交通分配问题, 具体步骤如下:

1) 路径生成。计算所有 OD 对每个模式的最短路径, 构建当前路径集。

2) 更新每个 OD 对的 OD Gap, 挑选 OD Gap 大于所需精度的 OD 对, 针对所挑选的 OD 对, 根据最新更新的路段流量和路段费用, 解决所选 OD 对的每种模式的路径流量调整子问题, 直到所有 OD 对都满足所需的精度。

上述路径生成包括 3 种最短路径问题的求解, 分别为道路最短路径问题、公交最短超路径问题和停车换乘最短超路径问题。对于道路网络上最短路径的计算相对成熟, 本文采用标号修正算法。关于公交最短超路径的算法是由每个终点向起点探索, 对于每次探索到的节点, 更新其最小费用, 直到将整个网络全部探索完毕, 最终得到任意节点到该终点的最短超路径费用和最优超路径子网络, 具体操作可依据文献[12-13]。通过对公交最短超路径算法的拓展又得到停车换乘最短超路径计算方法[8]。内循环中的路径流量调整子问题采用梯度投影算法求解每个 OD 对各模式路径流量[8]。

2.1.2 模式划分问题的求解

求解完多模式交通分配问题后, 采用自适应平均方法 (self-regulated averaging method, SRAM) 求解[14] 基于 CNL 的不动点模型。与传统的相继平均算法 (method of successive averages, MSA) 相比, SRAM 可以获得更高的求解精度和计算效率。这是由于 SRAM 使用基于当前解信息的自适应步长, 而不是像 MSA 使用预先确定的递减序列作为步长。

2.1.3 收敛判断

本文定义了 2 个相对间隙来评价求解精度, 用来评估模式划分求解精度和多模式交通分配问题的求解精度, 计算式分别为:

$$G_{\text{CNL}} = \|F(q) - q\| \quad (11)$$

$$G_{\text{UE}} = 1 - \frac{\sum_{w \in W} \sum_{m \in M^w} q_m^w \min\{c_{k,m}^w\}}{\sum_{w \in W} \sum_{m \in M^w} \sum_{k \in K_m^w} c_{k,m}^w h_{k,m}^w} \quad (12)$$

2.2 换乘点双层规划模型的求解

使用进化算法来搜索实际问题最优解时,每一代进化都需要大量真实值适应度评估,求解所消耗的时间会较长。为此提出基于响应面模型的优化算法用来求解提出的双层规划模型,这类算法的主要思想是利用显式的响应面模型近似目标函数与设计变量之间隐式的复杂的函数关系,通过响应面模型函数值计算来近似替代原问题复杂的模拟和计算过程,从而降低优化过程中消耗在原问题模拟和计算过程中的时间。步骤如下:

1) 初始化。设置初始扰动概率 P_{slet}^0 、最大连续成功次数 $C_{\text{success}}^{\text{max}}$ 、最大连续失败次数 $C_{\text{fail}}^{\text{max}}$ 、最大迭代次数 N_{max} ,生成初始评估点集,记为 I_0 ,设置迭代次数 $n=0$ 、连续成功计数器 $C_{\text{success}}=0$ 、连续失败计数器 $C_{\text{fail}}=0$ 。

2) 结合下层问题所得的路段流量和路段费用计算集合 I_0 中每个评估点 u_i 的目标函数值,记为 $Z(u_i)$,找到当前最优解,记为 u_{best} 。

3) 更新代理模型参数。基于当前评估点集 I_n ,重新计算构建响应面模型。

4) 构造候选点集 E_n 。基于扰动概率 P_{slet}^n 以及当前最优解 u_{best} ,构造候选点集合。

5) 候选点评估。结合预测值评分和距离评分,对候选点进行综合评分,从中选出一个评分最小的候选点,记为 u_{n+1} ,并计算该候选点目标函数值 $Z(u_{n+1})$ 。

6) 最优解更新。若 $Z(u_{n+1}) < Z(u_{\text{best}})$,则置 $u_{\text{best}} = u_{n+1}$ 、 $Z(u_{\text{best}}) = Z(u_{n+1})$ 、连续成功计数器 $C_{\text{success}} = C_{\text{success}} + 1$ 、连续失败计数器 $C_{\text{fail}} = 0$;否则,令 $C_{\text{fail}} = C_{\text{fail}} + 1$ 和 $C_{\text{success}} = 0$ 。

7) 评估点集和扰动概率更新。 $I_{n+1} = I_n \cup \{u_{n+1}\}$ 。如果 $C_{\text{success}} > C_{\text{success}}^{\text{max}}$,那么 $P_{\text{slet}}^{n+1} = \min\{2P_{\text{slet}}^n, P_{\text{slet}}^{\text{max}}\}$, $C_{\text{success}} = 0$;如果 $C_{\text{fail}} > C_{\text{fail}}^{\text{max}}$,那么 $P_{\text{slet}}^{n+1} = \max\{P_{\text{slet}}^n/2, P_{\text{slet}}^{\text{min}}\}$, $C_{\text{fail}} = 0$ 。其中 $P_{\text{slet}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{slet}}^{\text{min}}$ 分别为当前最大扰动概率和最小扰动概率。

8) 收敛判断。若 $n > N_{\text{max}}$,则迭代终止,输出 u_{best} ;否则,令 $n = n + 1$,返回步骤 3)。

2.2.1 初始评估点集生成

在上述步骤 1) 中,初始化需要随机生成一组初始评估点集合,记 $I_n = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, I_n 中包含 $n = l + 1$ 个评估点,其中, l 为多模式网络中候选修建的换乘点数,且需要保证集合中至少有 1 个评估点是可行解。该集合中的 l 个解要求线性无关,只有符合该条件, RBF 模型中的参数才能计算。1 个评估点即为 1 组修建换乘点的方

案。初始评估点集生成具体操作如下:

1) 初始化设置。评估点数 n , 令 $u_1 = 0$, $I_0 = \{u_1\}$ 。

2) 从 $i = 2$ 开始,置 $u_i = u_1$,令 a 为 u_i 中的第 i 个候选换乘点,把网络设计方案 u_i 中的换乘点 a 设置为新建换乘点,即置 u_a 数值均为 1。置 $I_0 = I_0 \cup \{u_i\}$ 。

3) 终止条件。当 $i = n$ 时终止,即已产生 n 个评估点,输出 I_0 ;否则,令 $i = i + 1$,返回步骤 2)。

2.2.2 RBF 响应面模型构建

常见的响应面模型主要有多项式回归模型、克里金模型和径向基模型(radial basis function, RBF)等。RBF 相比于克里金插值模型,其构造方法更加简单。同时,对于解决高维度和高阶非线性问题,该模型比多项式模型的求解精度更高。

给定一个包含 n 个解的解集 I_n , RBF 模型可以写成:

$$S(y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(\|y - y_i\|) + l(y) \quad (13)$$

其中: y_i 为解集 I_n 的第 i 个解; ϕ 为径向基函数,采用立方函数 $\phi(r) = r^3$ 表示; λ_i 为一个待确定的系数向量元素; $l(y)$ 是关于决策变量 y 的线性多项式,其形式为 $l(y) = p_0 + p^T y$ 。

2.2.3 候选点集合构建

对当前最优解 u_{best} 扰动产生候选点,候选点集合 E_n 构建的具体步骤如下:

1) 初始化设置。输入扰动概率 P_{slet}^n , 候选点集合的规模 M , 设置候选点集合 $E_n = \emptyset$, 扰动换乘点集合 $\bar{N}_c = \emptyset$ 。

2) 置 $u = u_{\text{best}}$, 任意候选换乘点 n 以概率 P_{slet}^n 入选扰动换乘点集合 $\bar{N}_c$, 如果扰动换乘点集合 $\bar{N}_c = \emptyset$, 那么在候选换乘点中随机选择一个换乘点加入扰动换乘点集合 $\bar{N}_c$ 。

3) 对于所有入选扰动换乘点集合的换乘点 $\bar{n}$, 把网络设计方案 u 中换乘点 $\bar{n}$ 的新建决策 $u_{\bar{n}}$ 设置为 $1 - u_{\bar{n}}$ 。

4) 终止条件。 E_n 中的候选点数量达到 M , 输出候选点集合 E_n 。

3 算例分析

采用算例分析对提出算法和模型的准确性及有效性进行分析,以 Sioux Falls 网络为例进行测试。网络包含 24 个节点、76 条路段、528 个 OD 对。测试所提出的模型和算法求解效果,通过算例分析比较代理模型算法与遗传算法的求解效

率;讨论不同参数以及划分模型对求解结果的影响。程序都采用 JAVA 编程实现,所有算例都在同一台配置 Inter Core i7-10700 2.90 GHz 处理器和 16 GiB 内存的计算机上运行。

3.1 算法对比测试

对上述双层规划模型分别采用代理模型算法和遗传算法进行求解。遗传算法初始解种群规模 m 设置为 15,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.2,模型参数 φ 取 0.1。代理模型算法中,最大扰动概率设置为 0.7,最小扰动概率设置为 0.05。

遗传算法和代理模型算法的收敛情况与效率情况对比如图 3 所示。

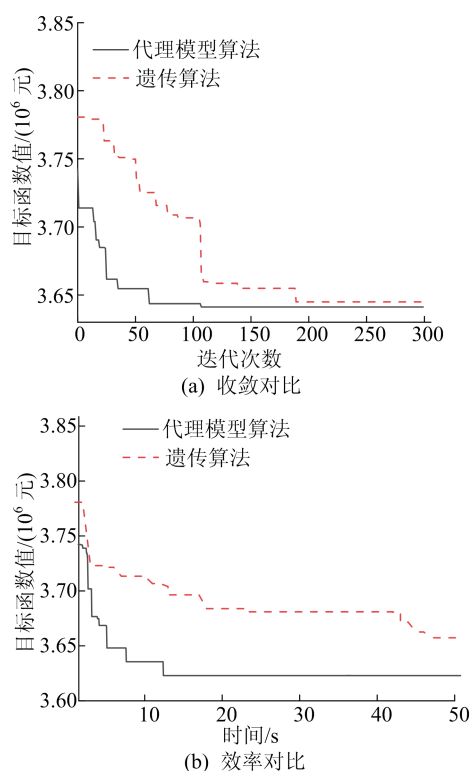


图 3 遗传算法和代理模型算法对比

由图 3 可知:在一定的迭代次数下 2 种算法均收敛,代理模型算法比遗传算法收敛得更快,且能够得到更优的目标函数值;相同时间下,代理模型算法相较于遗传算法能够得到更加精确的解。综上可以得出,相较于遗传算法,代理模型算法能够在更短的时间内获得更优的目标函数值。

3.2 灵敏度分析测试

3.2.1 划分模型对目标函数值的影响

为考虑不同划分模型对结果的影响,本文针对 4 种不同的划分模型进行测试,4 种划分模型分别为 CNL 模型、多项 Logit(multinomial logit, MNL)模型和 2 种情况下的巢式 Logit(nested

logit, NL)模型(记为 NL1、NL2),各划分模型的结构如图 4 所示。

MNL、NL1、NL2 和 CNL 中的 θ^w 取值均为 0.3, $\alpha_{em}^w, \lambda_e^w$ 取值见表 1 所列。对比分析不同划分模型对目标函数值的影响。

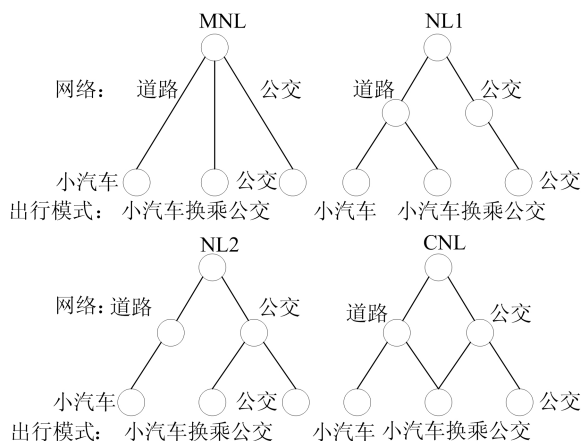


图 4 4 种模式划分模型结构

表 1 不同划分模式下 $\lambda_e^w, \alpha_{em}^w$ 取值

参数	模式	CNL		NL1		NL2		MNL	
		C	T	C	T	C	T	C	T
λ_e^w	Car	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0
	C&T	0.6	0.4	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
	Transit	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0

采用不同的划分模型会得到不同的目标函数值,结果如图 5 所示。其中 MNL 模型因为不包括停车换乘模式,所以无论换乘点的策略如何变化,目标函数值都没有变化, NL1 和 NL2 是 CNL 模型的 2 个极端情况,因此,通过使用 CNL 模型获得的结果都在 NL1 和 NL2 模型的相应结果之间。

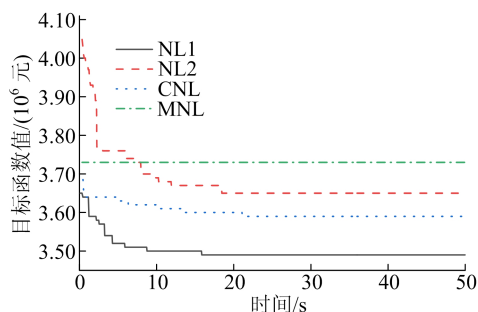


图 5 4 种模式划分模型结果对比

3.2.2 换乘点修建成本对目标函数值的影响

换乘点修建成本函数设置为 $g_{ij}(u_{ij}) = c_{ij}x_{ij}$, 其中 c_{ij} 取值为 120, x_{ij} 为虚拟换乘路段的路段流

量。为了分析比较不同修建成本对结果的影响,本文分别对成本函数乘以系数 λ ,对 λ 分别取值为0.2、1.0、5.0进行测试。

系数 λ 为0.2、1.0、5.0时上层目标函数值随时间的变化如图6所示。从图6可以看出,当修建成本增加时,系统总费用也会随着增大。不同建设成本下所需修建的换乘点数见表2所列。由表2可知,随着参数 λ 的变大所需修建的换乘点数会越来越少,这与设想的结果均相符。

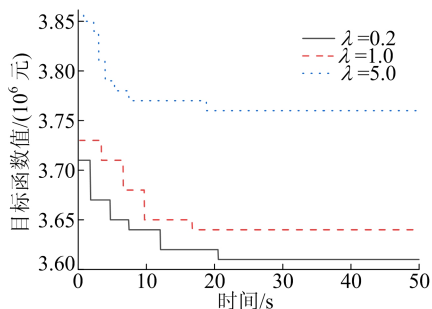


图6 不同建设成本下的上层目标函数值对比

表2 不同建设成本下所需修建的换乘点数

λ	0.2	1.0	5.0
换乘点数	17	16	9

4 结 论

本文提出一个基于双层规划模型的换乘点网络设计问题,上层用来决策换乘点的修建规划,下层采用基于CNL的模式划分和基于VI的交通分配描述出行方式的选择和路径选择行为,并提出结合SRAM和梯度投影的基于代理模型的算法来求解所构建的双层规划模型。通过Sioux Falls网络为例进行测试,结果表明:提出的双层规划模型和算法能够有效地求解换乘点网络设计问题;通过分析可知不同的换乘点建设成本以及模式划分模型对于结果有着显著的影响,其中在给定的时间下,随着单位建设成本的增加,系统总费用也随之更大,采用不同的划分模型最终的总出行费用也会随着划分模型的特征而改变;此外,通过与遗传算法的对比分析得到基于代理模型的算法在求解问题的效率和精度上效果更优。本文只分析了公交出行、小汽车出行及小汽车到公交换乘3种出行方式,考虑到更加符合实际需求,未来可以考虑更加多元的交通方式、更多种换乘方式站点的修建规划,同时也可考虑加入停车费用、停车时间及容量限制进行研究。

[参 考 文 献]

- [1] Abdulaal M, LeBlanc L J. Continuous equilibrium network design models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1979, 13(1): 19-32.
- [2] 赵彤,高自友. 城市交通网络设计问题中的双层规划模型[J]. 土木工程学报, 2003, 36(1): 6-10.
- [3] Madadi B, Nes R, Snelder M, et al. Multi-stage optimal design of road networks for automated vehicles with elastic multi-class demand[J]. Computers & Operations Research, 2021, 136: 105483.
- [4] 任华玲,高自友. 动态公交网络设计的双层规划模型及算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(5): 82-89.
- [5] Szeto W Y, Jiang Y. Transit route and frequency design: bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 67: 235-263.
- [6] Florian M. A traffic equilibrium model of travel by car and public transit modes [J]. Transportation Science, 1977, 11(2): 166-179.
- [7] Liu Z, Chen X, Meng Q, et al. Remote park-and-ride network equilibrium model and its applications[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 117: 37-62.
- [8] Fan Y, Ding J, Liu H, et al. Large-scale multimodal transportation network models and algorithms-Part I: the combined mode split and traffic assignment problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 164: 102832.
- [9] Wang Y, Liu H, Fan Y, et al. Large-scale multimodal transportation network models and algorithms-Part II: network capacity and network design problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 167: 102918.
- [10] Cantarella G E, Vitti A. The multi-criteria road network design problem in an urban area[J]. Transportation, 2006, 33(6): 567-588.
- [11] 庞远兵,张玺,石超峰. 考虑脆弱性的离散交通网络设计[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12201-12207.
- [12] Xu Z, Xie J, Liu X, et al. Hyperpath-based algorithms for the transit equilibrium assignment problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 143: 102102.
- [13] Nguyen S, Pallottino S. Equilibrium traffic assignment for large scale transit networks[J]. European Journal of Operational Research, 1988, 37(2): 176-186.
- [14] Liu H X, He X, He B. Method of successive weighted averages (MSWA) and self-regulated averaging schemes for solving stochastic user equilibrium problem[J]. Networks and Spatial Economics, 2009, 9(4): 485-503.

(责任编辑 吴 亮)